(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) 公開特許公報（A）　(11)特許出願公開番号
特開2002−357661
（P2002−357661A）
(43)公開日　平成14年12月13日(2002.12.13)

(51)Int.Cl.7	識別記号	ＦＩ	テーマコード(参考)
Ｇ０１Ｔ　1/161		Ｇ０１Ｔ　1/161	Ｅ　２Ｇ０８８

審査請求　未請求　請求項の数５　ＯＬ　（全７頁）

(21)出願番号　特願2001−163323(P2001−163323)

(22)出願日　平成13年5月30日(2001.5.30)

特許法第30条第1項適用申請有り　平成12年12月1日　理化学研究所　加速器基盤研究部　マルチトレーサー研究会主催の「理研シンポジウム　生体微量元素2000」において文書をもって発表

(71)出願人　396020800
科学技術振興事業団
埼玉県川口市本町４丁目１番８号

(71)出願人　301032942
独立行政法人放射線医学総合研究所
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号

(72)発明者　平澤　雅彦
千葉県千葉市稲毛区黒砂台三丁目４番12号
稲毛ベルハウス305号室

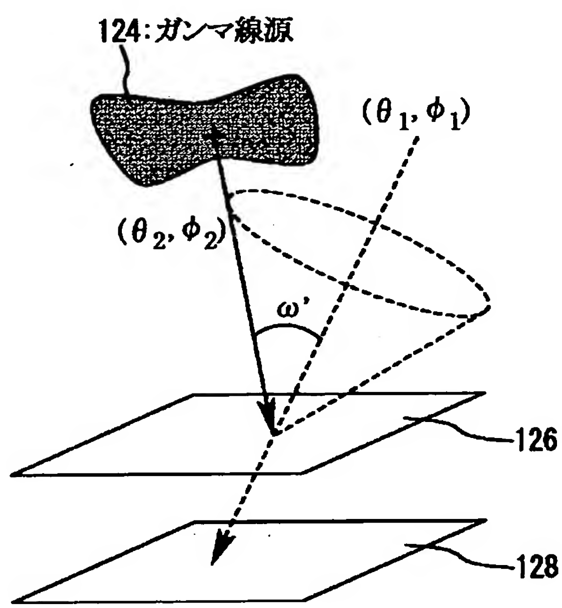
(72)発明者　富谷　武浩
千葉県千葉市中央区松波二丁目21番18号

(74)代理人　100105371
弁理士　加古　進

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　ライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ

(57)【要約】
【課題】ライン・プロジェクションを測定できるコンプトン・カメラの提供
【解決手段】既知エネルギー・ガンマ線源１２４からのガンマ線を前面検出器１２６および後面検出器１２８で、それぞれコンプトン散乱位置、相互作用位置を検出している。ガンマ線源１２４から、前面検出器１２６へガンマ線が（θ_2，ϕ_2）の角度で入射し、前面検出器１２６でコンプトン散乱（散乱角ω'）が発生して、その散乱ガンマ線が後面検出器１２８に入射したところを示している。この散乱ガンマ線の飛跡方向は、前面検出器１２６と後面検出器１２８のコンプトン散乱位置と相互作用位置を結ぶ直線の方向（θ_1，ϕ_1）である。この場合、ガンマ線源１２４は、この直線（θ_1，ϕ_1）を中心線とする頂角（散乱角）ω'の円錐内の方向にある。これにおいて、積分方程式を立てて解くことにより、ガンマ線源のライン・プロジェクションを求める。



【特許請求の範囲】

【請求項１】ガンマ線に対する前面検出器および後面検出器を有する、ガンマ線源を測定するコンプトン・カメラであって、
前記前面検出器および後面検出器は、前記ガンマ線源に対する測定開口角が鋭角となるように構成され、前記前面検出器は、前記ガンマ線源から入射したガンマ線によるコンプトン散乱位置を測定でき、前記後面検出器は、前記前面検出器からのコンプトン散乱後のガンマ線の入射位置を測定でき、
前記前面検出器および後面検出器による測定値を用いて、前記前面検出器からの前記ガンマ線源のライン・プロジェクションを演算する演算部を備えることを特徴とするライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ。

【請求項２】請求項１記載のコンプトン・カメラにおいて、前記後面検出器が任意の形状面でよいことを特徴とするコンプトン・カメラ。

【請求項３】請求項１又は２に記載のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラにおいて、前記演算部は、ライン・プロジェクションを、計測されるコンプトン散乱頻度分布関数を積分関数とする、実対称核をもつ第１種フレドホルム型積分方程式を、２乗可積分関数空間での線形作用素論を用いて解くことにより得ることを特徴とするライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ。

【請求項４】請求項１～３に記載のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラと、
前記コンプトン・カメラと分布ガンマ線源との間に、相対的な回転運動を得るための回転運動駆動装置と、
前記コンプトン・カメラから測定された前記分布ガンマ線源のライン・プロジェクションから、前記分布ガンマ線源の３次元分布画像を演算する画像演算部とを備えることを特徴とするガンマ線源３次元分布画像測定装置。

【請求項５】２台平行に設置した請求項１～３に記載のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラと、
前記２台のコンプトン・カメラにより測定された、点状ガンマ線源のライン・プロジェクションから、前記点状ガンマ線源の３次元位置を演算する位置演算部とを備え、前記点状ガンマ線源の３次元位置を測定することを特徴とするガンマ線源３次元位置測定装置。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】本発明は、ガンマ線源の位置を３次元的に測定するコンプトン・カメラに関するもので、特に、コンプトン・カメラを用いて分布ガンマ線源の３次元分布画像等を測定する技術分野に属する。

【０００２】

【技術的背景】コンプトン・カメラとは、ガンマ線のコンプトン散乱を利用し、ガンマ線源の位置を３次元的に測定する装置であり、その最初のもの（コーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ）は１９７４年に発案された。コンプトン・カメラは、一般に、ガンマ線源に対し前後に置いた２つのガンマ線検出器から構成される。コーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラとしては、（１）前方検出器でコンプトン散乱した後、後方検出器でもエネルギー付与相互作用をする既知エネルギー・ガンマ線の、前面検出器での付与エネルギーとコンプトン散乱位置、および、後面検出器での相互作用位置を利用する形態、（２）前方検出器でコンプトン散乱した後、後方検出器で光電吸収される既知エネルギー・ガンマ線の、前面検出器でのコンプトン散乱位置、および、後面検出器での付与エネルギーと光電吸収位置を利用する形態、の２つが考えられる。これらのコーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、１回のガンマ線入射に対して、そのガンマ線の放出位置を前方検出器でのコンプトン散乱点から広がる１つの円錐面上に限定する。そして、多数回のガンマ線入射による多数の円錐面を重ね合わせることにより、ガンマ線源の３次元位置を推定する装置である。このコーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、前者の形態では、前面検出器に高いエネルギー分解能が要求され、後者の形態では、後面検出器に高いエネルギー分解能が要求される。コンプトン・カメラで、分布ガンマ線源の３次元分布画像を構成することを考慮する場合、コンプトン散乱には後方散乱が含まれるため、最も効率よく分布ガンマ線源からのガンマ線を利用するには、図１（ａ）に示す二重球面型検出器のように、分布ガンマ線源１０２を囲む２重球面状の検出器１０４および１０６の配置が望まれる。しかし、これは、多くの検出素子を必要とするという欠点を持つ。そこで、図１（ａ）の１点鎖線で囲まれた部分のみを切り出し、図１（ｂ）に示すように、分布ガンマ線源１１４を検出器で囲まずに、前後においた２つの検出器１１６および１１８を用いて、分布ガンマ線源１１４を例えば回転台１１２により回転させるか、前後２つの検出器１１６および１１８を、分布ガンマ線源１１４を中心に周回させる装置が実用的なものとして考えられる。なお、図１（ｂ）のαは、測定開角である。一般に、ガンマ線の入射情報を利用し、分布ガンマ線源の３次元分布画像を構成する方法は、大きく２つに分けることができる。１つは、反復計算方法であり、他の１つは、解析的計算方法である。前者は、計算量が膨大となり、計算に比較的長時間を要するのに対し、後者は比較的短時間で計算を終了でき実用的である。コーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラに関しては、反復計算方法はすでに提案されているが、解析的計算方法の完全なものは未だ提案されていない。しかし、ＳＰＥＣＴ等のライン・プロジェクションを導出するガンマ・カメラに対しては、多くの完全

な解析的計算方法が提案されている。この多くの解析的計算方法は3次元計算機トモグラフィ（3次元CT）と呼ばれ、2次元のものは既に実用されている。しかし、ライン・プロジェクション導出型ガンマ・カメラはコリメータを用いるため、ガンマ線源からのガンマ線の利用効率が低いという欠点を持っている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構築することにより、ガンマ線源からのガンマ線を効率よく利用しつつ、3次元CTの適用により、分布ガンマ線源の実用的な3次元分布画像構成等を可能とすることを解決課題とする。

【0004】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するための、本発明である、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構築する。すなわち、本発明は、ガンマ線に対する前面検出器および後面検出器を有する、ガンマ線源を測定するコンプトン・カメラであって、前面検出器および後面検出器は、ガンマ線源に対する測定開口角が鋭角となるように構成し、前面検出器は、ガンマ線源から入射したガンマ線によるコンプトン散乱位置を測定でき、後面検出器は、前面検出器からのコンプトン散乱後のガンマ線の入射位置を測定でき、前面検出器および後面検出器による測定値を用いて、前面検出器からのガンマ線源のライン・プロジェクションを演算することを特徴としている。なおこの時、後面検出器は任意形状面とすることができる。ライン・プロジェクションは、多数の入射ガンマ線によるコンプトン散乱頻度分布関数を積分関数とし、実対称核をもつ第1種フレドホルム型積分方程式を、2乗可積分関数空間での線形作用素論を用いて解くことができる。このようなライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを、コンプトン・カメラに対して相対的に回転運動をしている分布ガンマ線源に対して用い、コンプトン・カメラから測定されたライン・プロジェクションに3次元CTを適用することにより、分布ガンマ線源の3次元分布画像を構成することができる。また、点状ガンマ線源に対して、ライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを2台平行に設置し、この2台のコンプトン・カメラにより測定された点状ガンマ線源に対するライン・プロジェクションから、点状ガンマ線源の3次元位置を特定することが可能となる。

【0005】

*【発明の実施の形態】本発明の実施形態を、図面を参照して詳細に説明する。本発明は、ライン・プロジェクションを導出するコンプトン・カメラを構成し、それにより得られるライン・プロジェクションに3次元CTを適用し、実用的でガンマ線利用効率のよい、分布ガンマ線源の3次元分布画像構成法等を得るものである。本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラでは、前面検出器でコンプトン散乱した後、後面検出器でエネルギー付与相互作用をする既知エネルギー・ガンマ線の、前面検出器でのコンプトン散乱位置、および、後面検出器での相互作用位置のみを利用するものであり、ガンマ線源の位置を前面検出器の各検出素子からのライン・プロジェクション（直線上のガンマ線放射能の積算値）として限定するものである。これは、前後面両検出器に高いエネルギー分解能を要求せず、かつ、ガンマ線利用効率のよいものとなる。ライン・プロジェクションが求められると、計算機トモグラフィを用いることにより、分布画像が求められることになる（例えば、斉藤恒雄「画像処理アルゴリズム」近代科学社　1993年等を参照されたい）。なお、ライン・プロジェクション導出等における計算は、計算機を用いて行うことができる。

【0006】図2を用いて、本発明中のライン・プロジェクション導出法について説明する。図2において、既知エネルギー・ガンマ線源124からのガンマ線を前面検出器126および後面検出器128で、それぞれコンプトン散乱位置、相互作用位置を検出している。図2では、ガンマ線源124から、前面検出器126へガンマ線が（θ_2，ϕ_2）の角度で入射し、前面検出器126でコンプトン散乱（散乱角ω'）され、その散乱ガンマ線が後面検出器128に入射したところを示している。この散乱ガンマ線の飛跡方向は、前面検出器126と後面検出器128のコンプトン散乱位置と相互作用位置を結ぶ直線の方向（θ_1，ϕ_1）である。この場合、ガンマ線源124は、この直線（θ_1，ϕ_1）を中心線とする頂角（散乱角）ω'の円錐内の方向にある。このような構成のコンプトン・カメラにおいて、以下の関数を定義する。なお、αは測定開角を示している。

【数1】$f''(\theta_1, \phi_1, \omega')$

：（θ_1，ϕ_1）方向の逆方向の単位平方角への、散乱角ω'近傍の単位角内からの、コンプトン散乱相対頻度分布の確率密度関数（測定値／測定総数）

【数2】

*

$$f'(\theta_1,\phi_1,\omega') \equiv \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sin\theta_1}\frac{1}{\sin\omega'}f''(\theta_1,\phi_1,\omega') \qquad (1)$$

：（θ_1，ϕ_1）方向の逆方向の単位立体角への、散乱角ω'方向の単位立体角からの、コンプトン散乱相対頻※

※度分布の確率密度関数

【数3】

$$f(\theta_1,\phi_1)\equiv 2\pi\int_{-1}^{1}d(\cos\omega')f'(\theta_1,\phi_1,\omega') \qquad (2)$$

：（θ_1，ϕ_1）方向の逆方向の単位立体角への、コンプトン散乱相対頻度分布の確率密度関数
【数4】ｇ（θ_2，ϕ_2）
：（θ_2，ϕ_2）方向の単位立体角内の物質から、原点の周りの単位面積に向けて放射される、放射線量相対分布の確率密度関数（求解；相対ライン・プロジェクション）＊
＊【数5】ｈ（ｃｏｓω）
：散乱角ωでのコンプトン散乱の微分断面積／全断面積（例：クライン・仁科の式）
上述のように、定義した式を用いると、解くべき方程式は、以下のようになる。
【数6】

$$f(\theta_1,\phi_1)=\int_{a}^{1}d(\cos\theta_2)\int_0^{2\pi}d\phi_2 h(\cos\omega)g(\theta_2,\phi_2) \qquad (3)$$

$$\cos\omega\equiv\cos\theta_1\cos\theta_2+\sin\theta_1\sin\theta_2\cos(\phi_1-\phi_2) \qquad (4)$$

$$g(\theta_2,\phi_2)=0 \quad (\theta_2>\alpha\,;\ a\equiv\cos\alpha) \qquad (5)$$

【０００７】この方程式は、第１種フレドホルム（Fredholm）型積分方程式の１つで、この方程式の積分核であるｈ（ｃｏｓω）は、（θ_1，ϕ_1）および（θ_2，ϕ_2）に関して対称な実数値関数である。実対象核を持つ第１種のフレドホルム型積分方程式は、要素が２乗可積分関数である、無限次元のヒルベルト空間における線形※作用素論の中で取り扱うことができる。以下に、上述の第１種フレドホルム型積分方程式の解法を一般化された形式で説明する。さて、解くべき実対称核Ｋ（ｔ，ｕ）を持つ第１種フレドホルム型積分方程式は、以下のように表せる。
【数7】

$$f(t)=\int_S du\,K(t,u)\,g(u) \qquad (K(t,u)=K(u,t)) \qquad (6)$$

これにおいて、以下の解法により、ｇ（ｕ）を求める。まず、｛ϕ_i（ｕ）｝を、Ｓ上の任意の複素正規直交完備関数系とする。これを用いて、ｎ次正方行列A_nの要★素a_{ij}を以下のように定義する。
【数8】

$$a_{ij}\equiv\int_S dt\int_S du\,\overline{\varphi_i(t)}\,K(u,t)\varphi_j(u) \qquad (7)$$

この正方行列A_nをＪｏｒｄａｎ標準形λ_nで書き表すと、☆
☆【数9】

$$A_n=B_n\lambda_n\overline{{}^tB_n} \qquad (8)$$

となる。ここで、c_iを以下のように定義する。
【数10】

$$c_i\equiv\int_S dt\,f(t)\overline{\varphi_i(t)} \qquad (9)$$

◆これを用いて、ｇ（ｕ）は、以下の計算で求めることができる。
【数11】

$$g(u)=\lim_{n\to\infty}\left[(c_1,\ldots,c_n)B_n\,\lambda_n^{-1}\,\overline{{}^tB_n}\begin{pmatrix}\phi_1(u)\\ \vdots\\ \phi_n(u)\end{pmatrix}\right] \qquad (10)$$

【０００８】式（１０）の計算においては、式（７），式（８）は、事前に計算しておくことが可能であるため、規定時間のｆ（ｔ）の測定後、式（９）を順に計算し、式（１０）が十分に収束したところで計算を終えることができる。上述の複素正規直交完備関数系としては、例えば、単位球面上の実球面調和関数Y_{nm}（θ，φ）を用いることができる。この実球面調和関数Y_{nm}（θ，φ）は、図3に示されている。この解法は、使用する複素正規直交完備関数系を適当に選ぶことにより、＊任意の測定開角αに適用することが可能であり、実用的なコンプトン・カメラにおける鋭角の測定開角α（０＜α＜９０°）に対して適用することができるだけでなく、任意の形状の後面検出器に対しても適用することが可能である。さらには、この解法では、２重の検出器での相互作用位置情報のみを必要とし、検出器への付与エネルギー情報を必要としない。従って、この解法を利用する本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、前後面両検出器に高いエネルギー分解能

を要求しない。

【０００９】図４に、点状ガンマ線源に対し、本発明のコンプトン・カメラを適用した計算結果の例を示す。図４（ａ），図４（ｂ），図４（ｃ）は、同じ位置にある点状のガンマ線源に対して、計算次数を上げて、ガンマ線源の位置のシミュレーション結果を図示したものである。図４から分かるように、計算次数が上がるに従い、想定した点状ガンマ線源の位置に分布が収束して行っており、本発明のコンプトン・カメラでのライン・プロジェクション導出の正当性を示している。

【００１０】

【実施例】［実施例１］図５に、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラの実用的な検出器配置の例を示す。この例では、ヒト頭部１３４内のＲＩトレーサ（ガンマ線源）分布の診断例を示しており、図５（ａ）は上から見た上面図、図５（ｂ）は横から見た側面図である。前面検出器１３６としては、例えば半導体ガンマ線検出素子を格子状に３５×５０個並べたものを用い、後面検出器１３８としては１００×１００個並べたものを用いている。そして、ヒト頭部１３４又はライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ側を回転させ、それぞれの位置におけるライン・プロジェクションを得、３次元計算機トモグラフィを適用し、ＲＩトレーサの３次元分布画像を得ている。それぞれの検出素子の大きさを、ヒト頭部１３４を球で近似した直径をφとして、例えばφ／１００×φ／１００とすると、理論的解像度としては、φ／５０を得ることができる。図５のような構成のものを、従来のＳＰＥＣＴと比較した場合、空間分解能はほぼ同じでありながら約１００倍のガンマ線利用効率を持つことになる。これにより、被測定者および測定者の放射線被爆量を大きく抑えることができる。

【００１１】［実施例２］図６は、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを利用した放射性物質漏出事故位置特定への応用例を示している。図６に示すように、比較的遠くにある放射性物質漏出事故位置１４１の３次元位置を特定するために、本発明によるライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラ２台（１４２および１４４と、１４３および１４５）を平行において、それぞれのコンプトン・カメラで、放射性物質漏出事故位置の小範囲放射線源に対するライン・プロジェクションを求める。求めたライン・プロジェクションの交点が、放射性物質漏出事故の３次元位置となる。

【００１２】

【発明の効果】上述のように、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラは、実用的な時間で放射線源のライン・プロジェクションを求めることができる。また、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラに使用するガンマ線検出器は、高いエネルギー分解能を必要としない。本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを用いることにより、高効率にガンマ線を利用しつつ、分布ガンマ線源の３次元分布画像を得ることができる。また、本発明のライン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラを放射性物質漏出事故に適用することにより、ガンマ線を発生している事故位置を３次元的に特定することもできる。

【図面の簡単な説明】

【図１】コンプトン・カメラの二重球面型検出器と二重平面型検出器との比較を示した図である。

【図２】コーン・プロジェクション導出型コンプトン・カメラの原理を示したものである。

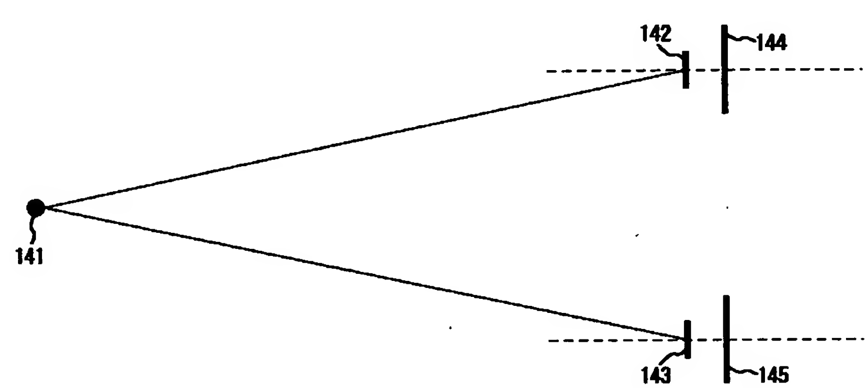
【図３】実球面調和関数系を示す図である。

【図４】点状ガンマ線源に対するシミュレーションの計算結果を示す図である。

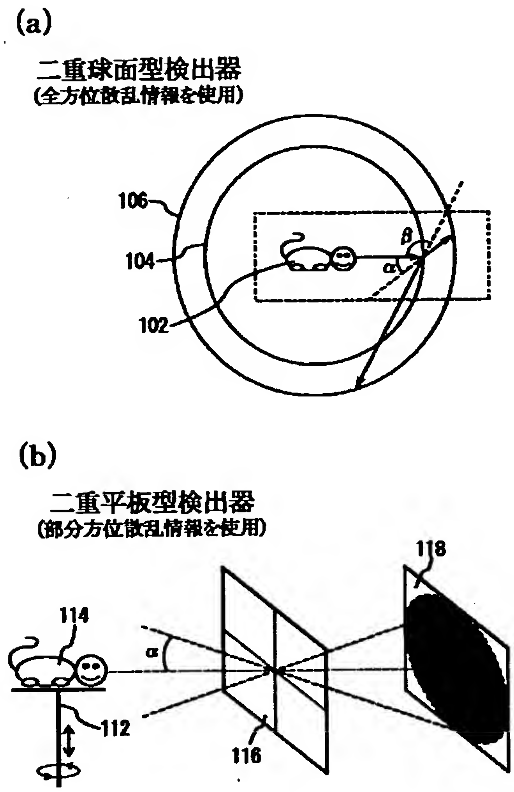
【図５】ヒト頭部診断に対する応用を示す図である。

【図６】放射線事故位置特定に対する応用を示す図である。

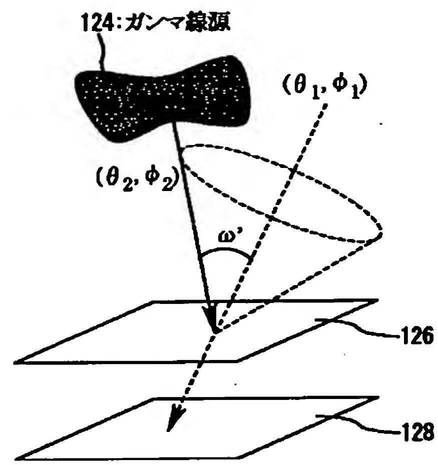
【図６】



【図1】



【図2】



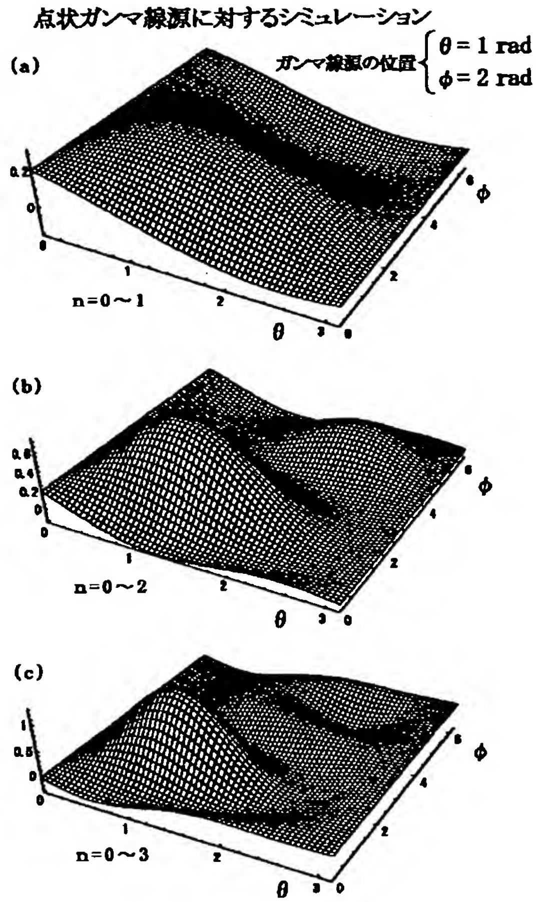
【図3】

実球面調和関数系

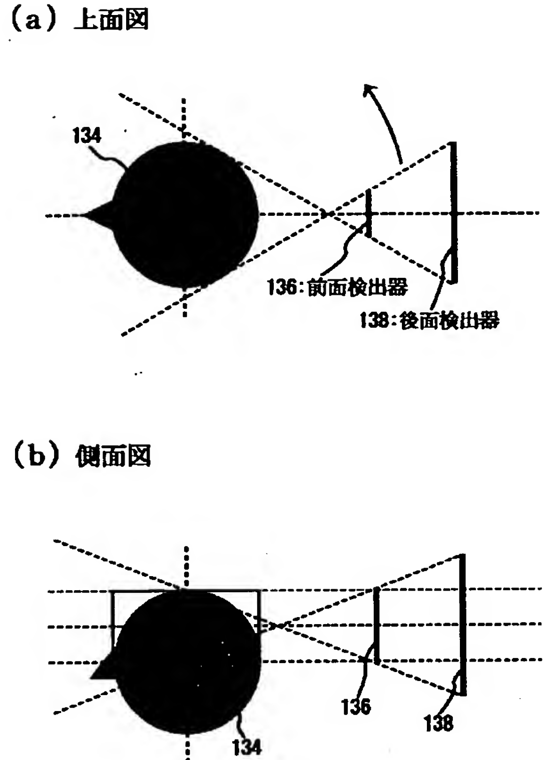
$$
\left.
\begin{array}{ll}
Y_{lm}(\theta,\phi) \equiv \left[\dfrac{2l+1}{4\pi}\right]^{\frac{1}{2}} P_l(\cos\theta) & m=0 \\
Y_{lm}(\theta,\phi) \equiv \left[\dfrac{2l+1}{2\pi}\dfrac{(l-m)!}{(l+m)!}\right]^{\frac{1}{2}} P_l^m(\cos\theta)\sin(m\phi) & 1 \le m \le l \\
Y_{lm}(\theta,\phi) \equiv \left[\dfrac{2l+1}{2\pi}\dfrac{(l-m)!}{(l+m)!}\right]^{\frac{1}{2}} P_l^m(\cos\theta)\cos(m\phi) & 1 \le m \le l
\end{array}
\right\} \; l \ge 0
$$

$$
\left(
\begin{array}{l}
P_l^m(x) \equiv (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \dfrac{d^m P_l(x)}{dx^m} \\
P_l^{-m}(x) \equiv (-1)^m \dfrac{(l-m)!}{(l+m)!} P_l^m(x)
\end{array}
\quad (l \in (0,N), 0 \le m \le l)
\right)
$$

【図4】



【図5】



フロントページの続き

(72)発明者　柴田　貞夫
千葉県柏市あけぼの四丁目10番18号

Fターム(参考)　2G088 EE02 FF04 KK33